

黎诗宏, 梁斌, 李忠惠. 螯合剂对龙葵修复成都平原 Cd 污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1917–1922.

LI Shi-hong, LIANG Bin, LI Zhong-hui. Effects of the chelator on *Solanum nigrum* L. remediation of cadmium polluted soil in Chengdu Plain
题目[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1917–1922.

螯合剂对龙葵修复成都平原 Cd 污染土壤的影响

黎诗宏^{1,2}, 梁斌^{1,2*}, 李忠惠²

(1.西南科技大学环境与资源学院地质工程系, 四川 绵阳 621010; 2.四川省地质调查院, 成都 610081)

摘要:在成都平原绵竹地区选取两种污染程度和酸碱性程度不同的土壤,采用盆栽试验研究了两种螯合剂(柠檬酸和 EDTA)对龙葵(*Solanum nigrum* L.)修复 Cd 污染土壤和改变土壤 pH 的影响。结果表明:随着柠檬酸浓度的增加,Cd 含量为 $1.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高污染土壤(MZT-01)上的植株的生物量均有下降趋势;Cd 含量为 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低污染土壤(MZT-02)上的植株的生物量则有明显的上升趋势,并在 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大。在柠檬酸为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,龙葵在两种土壤中 Cd 胁迫下的含量、吸收总量和富集系数均达到最大,植物修复效果最好;浓度为 $1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 EDTA 对龙葵产生了毒害作用,吸收效果低于对照组。螯合剂对中性土壤 pH 影响较大,pH 值从 6.35 降到 5.57,而对酸性土壤基本没有影响。

关键词: 镉;pH;龙葵;螯合剂;植物修复;成都平原

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)10-1917-06 doi:10.11654/jaes.2016-0371

Effects of the chelator on *Solanum nigrum* L. remediation of cadmium polluted soil in Chengdu Plain

LI Shi-hong^{1,2}, LIANG Bin^{1,2*}, LI Zhong-hui²

(1.School of Environment and Resource of Southwest University of Science and Technology, Geological Engineering, Mianyang 621010, China; 2.Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Selected two kinds of soil about different cadmium pollution and different pH in Chengdu Plain Mianzhu Area. A pot culture experiment was designed to study the effects of two kinds of chelator (citric acid and EDTA) on *Solanum nigrum* L. remediation of cadmium polluted soil and the changes of soil pH. The results showed that with the increase of the concentration of the citric acid, the biomass of *Solanum nigrum* L. in high pollution soil (MZT-01), whose Cd content was $1.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, was declined; while the biomass in low pollution soil (MZT-02), whose Cd content was $0.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, was significantly risen and reached a maximum when the citric acid was $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. When the citric acid was $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, under the stress of Cd in two kinds of soil, the content, the absorptive amount and enrichment factors of *Solanum nigrum* L. could rise to the maximum, and the phytoremediation effect was the best. EDTA poisoned *Solanum nigrum* L. and the absorption effect was lower than the control group when EDTA was $1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. Chelator had a greater influence on pH of the neutral soil, pH from 6.35 to 5.57, but almost had no influence on pH of the acid soil.

Keywords: cadmium; pH; *Solanum nigrum* L.; chelator; phytoremediation; Chengdu Plain

随着成都经济的快速发展,部分地区 Cd 污染已相当严重^[1]。近年来,在成都平原相继开展的 1:25 万区域生态地球化学以及“金土地”工程农业地质调查

中发现,由于受高 Cd 地质背景及工业生产等因素的影响,在成都平原局部地区农田土壤受到不同程度的镉污染^[2-3]。水稻作为成都平原主要农作物之一,其局部地区水稻中 Cd 含量明显偏高,极可能加大 Cd 对该区域人群健康的危害风险^[3-4]。因此,对成都平原地区 Cd 污染土壤修复显得十分重要。

在众多土壤修复方法中超积累植物修复具有较好的应用前景,因为该项技术具有修复效果好、经济和环保等优势^[5-7]。在目前已发现的 400 多种超积累植

收稿日期:2016-03-21

基金项目:四川省国土资源厅科技项目(KJ-2012-3);四川省国土资源厅地勘基金项目(201402)

作者简介:黎诗宏(1989—),男,硕士研究生,主要从事环境地球化学方面研究。E-mail:lishihongpfx@163.com

*通信作者:梁斌 E-mail:earllih@163.com

物中^[8],龙葵是我国学者发现的一种Cd超积累植物,具有生物量大、耐受性强、繁殖能力强和富集能力强等优势^[9]。柠檬酸和EDTA是目前应用较为普遍的螯合剂,它们可改变重金属Cd的形态并促进其释放,进而加强植物吸收和积累土壤中的Cd,因此常用于强化Cd污染土壤的植物修复^[10-13]。Zaheer等^[14]利用费萨尔油菜修复Cu污染土壤,发现柠檬酸可显著增加植物生物量、叶绿素含量,并且还能增加对Cu的吸收;刘萍等^[15]将柠檬酸用在Cd-Pb复合污染的土壤上,对植物生长起到了一定的促进作用,并且龙葵对Cd的富集系数可达到3.59;张玉芬等^[16]研究柠檬酸和EDTA对蓖麻修复土壤时发现,柠檬酸与EDTA联用使蓖麻单株总Cd富集量达到74.59 μg ,是对照组的2.98倍;刘金等^[17]研究苧麻在镉铅混合污染下螯合剂对其吸收重金属的影响,得出EDTA的施加极大地促进了苧麻各部位对Cd和Pb的吸收;王坤等^[18]研究发现龙葵在土壤Cd含量相同的情况下,地上部分植物吸收Cd量以EDTA处理最大。然而众多植物修复试验中针对实际污染地区土壤特征的植物修复报道较少^[19]。以往大多采用向自然土壤中投加 CdCl_2 或者 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 的形式达到模拟污染的目的,且通常设计的污染浓度都较高^[15-16,20-21],并不符合实际污染区污染程度以及土壤的性质特征^[2-3,22]。

本文在成都平原绵竹地区选取了两个镉污染程度不同的区域采集表层土,利用室内盆栽试验,将柠檬酸和EDTA作为螯合剂应用到龙葵修复Cd污染土壤的试验中,探求不同浓度下螯合剂对龙葵修复成都平原中Cd污染土壤和对土壤酸碱性变化的影响,以期在龙葵在螯合剂的作用下修复成都平原地区受Cd污染的土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样采自绵竹市某区域内污染程度不同的两种土壤,质地为潴育水稻土,田间持水量21%。该区内MZT-01土壤基本性质为:pH 7.09,有机质57.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,水解性氮171 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷59.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾123 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CEC(阳离子交换量)11.1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,总镉1.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过国家土壤环境质量(GB 15618—1995)的三级标准;MZT-02土壤基本性质为:pH 6.16,有机质40.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,水解性氮166 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷31.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾117 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CEC 12.4 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,总镉0.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过国家土壤环境质量

(GB 15618—1995)的二级标准。龙葵种子购于网上农资专卖店。

1.2 试验设计

1.2.1 装盆及场地选择

将3 kg污染土壤样品与20 g复合肥均匀混合,并装入已编号的塑料盆(直径25 cm、高25 cm)中,调节土壤含水量到田间持水量。试验场地为西南科技大学西三实验楼后的空地,周围无污染来源。

1.2.2 试验设计

试验共设5个处理(CK、A、B、C、D),3次重复。具体处理:CK组为不添加螯合剂,A组添加柠檬酸浓度为1 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,B组添加柠檬酸浓度为5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,C组添加柠檬酸浓度为10 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,D组添加EDTA浓度为1 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。选取成熟饱满的龙葵种子经消毒后,用去离子水浸泡24 h。在25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱内培育发芽;7 d后,选择两株长势良好、大小一致的幼苗移栽于塑料盆中,并将塑料盆移至露天培养,去离子水进行浇灌保持田间水量;12 d后,只留1株长势最好的龙葵。在移栽25 d后,根据幼苗发育程度适当追施5 g复合肥;在移栽后第15、22、30 d时分别进行螯合剂处理。

1.2.3 试验植物收割及测试

当植物成熟收获后(76 d),将植物地上部分用自来水冲洗后再用去离子水洗净,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,然后在70 $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重,称量干物质重量,烘干并密封保存;根系土装入专用布袋,并于自然光下晾干,研磨过20目筛并装入信封送至成都综合岩矿测试中心,测定样品中的Cd含量和根系土pH值。样品采用 HNO_3 - HClO_4 (体积比4:1)消解法,电感耦合等离子体光谱法(X Series II ICP-MS)测定Cd含量;采用pH计测试土壤pH值。

1.2.4 统计分析

采用Excel 2010和SPSS 20对数据进行统计分析和方差分析,显著性差异水平取0.05。

2 结果与分析

2.1 螯合剂对龙葵生物量的影响

柠檬酸和EDTA对龙葵生长量的影响如表1所示。随着柠檬酸浓度的增加,两种土壤中的生物量表现出不同的变化趋势。在MZT-01的植株中,添加了螯合剂的生物量比CK组下降了19.21%~56%,但只有CK与D处理之间表现出显著差异,可能是因为EDTA的毒性严重影响到龙葵的生长。在MZT-02的

植株中,低浓度螯合剂 A、B、D 处理时,与 CK 比较,生物量虽未有显著性增加,但在平均生物量基础上增加了近 1 倍;而当高浓度柠檬酸 C 处理时,生物量却略有下降。

2.2 螯合剂对龙葵吸收 Cd 的影响

2.2.1 螯合剂对龙葵茎叶中 Cd 含量的影响

不同螯合剂加入土壤后,龙葵茎叶 Cd 含量的变化如图 1 所示。A 处理后,两种土壤中龙葵 Cd 含量均有升高,并且 MZT-02 龙葵的 Cd 含量显著升高;B 处理后,两种土壤中龙葵 Cd 含量继续上升,但上升趋势已减缓;C 处理后,两种土壤中龙葵 Cd 含量均比 B 处理后的低,其中 MZT-02 龙葵中 Cd 的含量发生了骤降,但仍比 CK 中龙葵 Cd 含量高。在试验中 A、B、C 处理与 CK 比较,龙葵 Cd 含量均有升高,并且在 B 处理时达到峰值。不同螯合剂对两种土壤中龙葵 Cd 含量的方差分析结果表明(图 1),无论对于 MZT-01 或者 MZT-02,不同的螯合剂添加后,龙葵中 Cd 的含量与 CK 相比变化不显著($P>0.05$),各螯合剂处理之间龙葵中 Cd 含量差异也不明显($P>0.05$),只是 MZT-02

中添加 EDTA 处理与其余螯合剂处理相比变化显著($P<0.05$),说明试验所用螯合剂对龙葵吸收两种土壤中的 Cd 没有显著的促进作用。

2.2.2 螯合剂对龙葵茎叶中 Cd 吸收量的影响

螯合剂对龙葵茎叶 Cd 吸收量的影响如图 2 所示。龙葵地面以上部分的吸收量是茎叶 Cd 含量与地面以上龙葵生物量的积,能非常直观地反映植物修复效果。龙葵对 Cd 的吸收量呈现出先增大后减小的趋势,在两种土壤中龙葵的吸收量均在 B 处理达到最大,且吸收量相当,其中 MZT-01 较空白上升了 26.54%,MZT-02 较空白上升了 179.74%。两组的 CK 相对比,MZT-01 中龙葵的吸收量明显高于 MZT-02。由此说明,不用螯合剂处理的情况下,龙葵对高污染土壤中的 Cd 吸收效果更好;在螯合剂处理的情况下,龙葵对低污染土壤中的 Cd 吸收效果更为显著,并且在 B 处理的条件下达到 $132.99 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 的最大值,明显高于柠檬酸和 EDTA 强化蓖麻对高 Cd 供试土壤中 Cd 的积累量($32.85 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)^[6]。

从表 1 和图 1 可以看到,两种土壤 30 件样品中

表 1 柠檬酸和 EDTA 对龙葵生物量、富集系数和根系土 pH 的影响

Table 1 Effects of citric acid and EDTA on the biomass and bioconcentration factors of *Solanum nigrum* L. and pH in root soil

处理 Treatments	螯合剂浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ Concentration of chelator	茎叶生物总量/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ Biomass of stem and leaf		茎叶富集系数 Bioconcentration factors of stem and leaf		根系土 pH pH in root soil	
		MZT-01	MZT-02	MZT-01	MZT-02	MZT-01	MZT-02
CK	0	15.51±3.28b	3.89±2.73a	5.26	14.2	6.35±0.23b	4.91±0.13a
A	柠檬酸 1	12.53±6.4ab	7.44±0.21a	7.75	18.43	5.77±0.17a	4.96±0.13a
B	柠檬酸 5	12.12±1.49ab	7.32±4.31a	8.53	19.33	5.57±0.04a	5.01±0.09a
C	柠檬酸 10	10.62±1.39ab	3.37±1.59a	7.88	11.43	5.58±0.22a	4.94±0.14a
D	EDTA 1	6.83±3.24a	5.55±1.21a	4.39	2.92	5.85±0.1a	5.12±0.22a

注:不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著。图 1,图 2 同。

Note: Different letters denote significant difference at 0.05 level. The same Figure 1, Figure 2.

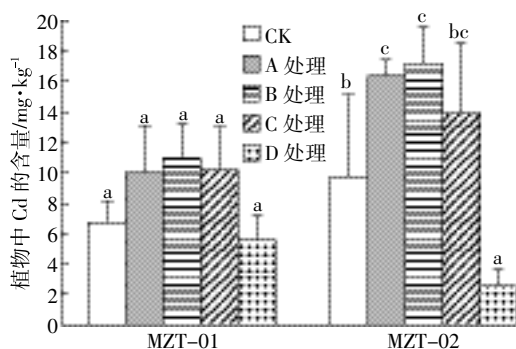


图 1 螯合剂对龙葵茎叶 Cd 含量的影响

Figure 1 Effects of chelator on content of Cd in stem and leaf of *Solanum nigrum* L.

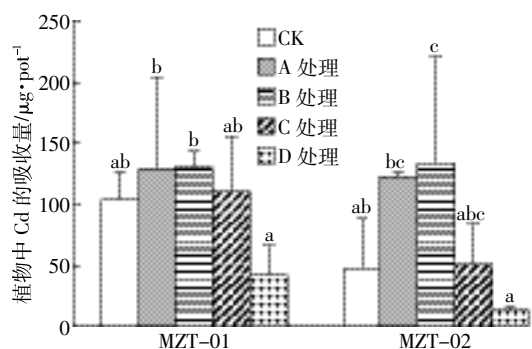


图 2 螯合剂对龙葵茎叶 Cd 吸收量的影响

Figure 2 Effects of chelator on absorptive amount of Cd in stem and leaf of *Solanum nigrum* L.

茎叶生物总量与相应样品 Cd 含量之间并没有显著的相关性,说明龙葵茎叶中 Cd 的含量并不严格地受龙葵长势的影响。因此,在植物中 Cd 含量变化不明显的情况下,应主要考虑龙葵生物量的最大化,以保证最终达到修复效果的显著化。

2.3 螯合剂对土壤 pH 的影响

从表 1 可以看出,在添加螯合剂后,MZT-01 中龙葵根系土的 pH 呈现下降的趋势,并且变化幅度较大,MZT-02 中龙葵根系土的 pH 变化幅度较小,且呈现微弱的上升趋势,但仍远低于中性土的下限值(pH 为 6.5),说明龙葵的根际环境应为酸性。方差分析结果表明(表 1),两个 CK 组的 pH 较原土均有下降。在 MZT-01 土壤中,不同的螯合剂添加后根系土 pH 与 CK 组相比变化显著($P<0.05$),但 MZT-02 中没有显著变化。这可能是因为龙葵根系本身分泌了大量的有机酸类物质,使根际环境产生了明显的酸化,活化了重金属并促进其吸收进入龙葵体内,其中中性土壤影响根系分泌有机酸的作用较弱,从而表现出添加螯合剂后土壤 pH 明显降低;而酸性土壤影响根系分泌有机酸的作用较强,虽然加入的外源螯合剂对 pH 略有影响,但与根系分泌的有机酸相比其作用仍十分有限。

2.4 螯合剂对龙葵 Cd 富集系数的影响

植物对重金属的富集系数是评价超积累植物的重要指标之一^[23]。由于 EDTA 的毒性影响了龙葵的正常生长,不能准确反映龙葵对 Cd 的富集系数,本文并未讨论加入 EDTA 后龙葵对 Cd 的富集系数。从表 1 可以看出,MZT-01 土壤中龙葵对 Cd 的富集系数达到了 5.26~8.53;MZT-02 土壤中龙葵对 Cd 的富集系数达到了 11.43~19.33,两种土壤中龙葵的富集系数均远超富集系数为 1 的衡量标准^[9],说明龙葵对成都平原土壤中的 Cd 具有较强的吸收作用。通常情况下,土壤中重金属的含量相对较低时,植物的富集系数就相对较高^[9,15],本试验同样符合此规律,在添加柠檬酸的情况下,MZT-01 龙葵对 Cd 的富集系数仅为 MZT-02 的 42.05%~68.94%。

3 讨论

外源有机酸在一定程度上也能够通过活化作用而使土壤中重金属活性提高,并释放出来增加其迁移性而利于植物吸收^[24-25],但外源有机酸浓度过大时,又会降低植物修复的效率^[26]。本试验也发现,添加柠檬酸在一定程度上对龙葵吸收 Cd 起到了较为明显的

促进作用,但添加浓度过高时,龙葵对 Cd 的吸收量开始降低。这可能是因为柠檬酸的加入使土壤中可交换态 Cd 的含量减少的缘故^[26]。

EDTA 在促进植物吸收重金属的同时也可能因其具有一定毒性而影响植物生长。有研究表明,EDTA 可在很大程度上增加土壤溶液中重金属的含量^[27],甚至能提高植物对 Cd 的富集量,但因其具有一定毒性,当浓度较高时会抑制植物的正常生长^[3,28],从而导致植物对 Cd 的富集量减少,最终造成修复成本的增大。刘金等^[17]研究表明,施加不同浓度的 EDTA 均会减少苕麻地上部的生物量。吴秋玲等^[29]的研究也表明 EDTA 可显著提高黑麦草地上部的 Pb 浓度,但抑制了植物的生长,生物量显著下降。本试验发现 EDTA 加入高污染的 MZT-01 中,龙葵的生长状况明显弱于其余对照组,并且茎叶中的 Cd 含量和 Cd 吸收量也均低于其余各组;EDTA 加入低污染的 MZT-02 中,龙葵的生物量虽不是最低,但茎叶中的 Cd 含量和 Cd 吸收量却最低。而雒焕章等^[30]研究螯合剂强化杨树叶部对土壤中 Cd 的富集能力时认为,添加 EDTA 的富集能力大于柠檬酸。这可能是因为杨树对 EDTA 的毒性适应能力较强,并明显强于龙葵。EDTA 对植物生长造成的影响可能源于 EDTA 与土壤溶液中的重金属离子络合形成金属螯合物,降低了土壤液相中重金属离子的浓度^[31],其在植物转移过程中破坏植物组织的细胞质膜^[17],造成重金属累积,对植物产生毒害。因此,可以排除利用浓度 $1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的 EDTA 作为螯合剂来强化龙葵修复土壤。

植物在重金属的胁迫下,其分泌的有机酸会明显增多,进而导致重金属活性显著增强^[32]。而本试验所用 MZT-01(中性土壤)Cd 含量明显高于 MZT-02(酸性土壤),但 MZT-01 中龙葵茎叶的 Cd 含量却低于 MZT-02。这说明土壤的酸性环境是增强重金属 Cd 活性的主要因素,与郭智^[33]研究土壤 pH 是一个调节金属移动性和生物有效性的重要因素,许多重金属在土壤酸性程度增强时,其移动性和生物有效性也相应增强的结论一致。所以龙葵在土壤酸性条件下修复效果最好,但在采用有机酸螯合剂修复中性和碱性土壤时,又需注意修复后对土壤带来较明显的酸化影响。针对成都平原,土壤主要为中酸性,而且主要农作物为水稻,水稻的 Cd 含量又与土壤的 pH 呈显著负相关^[34],所以在修复时需要着重考虑螯合剂给中性土壤带来的酸化作用影响。

4 结论

(1)龙葵对Cd具有很强的富集能力,并且添加柠檬酸的生长与CK组相比也未受到抑制,茎叶中Cd含量达到 $6.7\sim 17.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总吸收量达到 $51.11\sim 132.99\text{ }\mu\text{g}$,富集系数达到了 $5.26\sim 19.33$ 。在柠檬酸浓度为 $5\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,龙葵在两种土壤Cd胁迫下的含量、吸收总量和富集系数均达到最大,并实现了高效率的修复目的。

(2) $1\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的EDTA对龙葵修复Cd污染土壤时,影响了龙葵的正常生长,导致吸收量很低,因此不适合用来强化龙葵修复成都平原受Cd污染的土壤。

(3)龙葵在土壤酸性条件下修复效果最好,但在采用有机酸螯合剂修复中性土壤时,需注意修复带来的酸化影响。

参考文献:

- [1] 李冰,王昌全,谭婷,等.成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J].核农学报,2009,23(2):308-315.
LI Bing, WANG Chang-quan, TAN Ting, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu Plain[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2):308-315.
- [2] 杨刚,李燕,巫林,等.成都平原表层水稻土重金属污染健康风险分析[J].环境化学,2014,33(2):269-275.
YANG Gang, LI Yan, WU Lin, et al. Concentration and health risk of heavy metals in topsoil of paddy field of Chengdu Plain[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(2):269-275.
- [3] 秦鱼生,喻华,冯文强,等.成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评估[J].生态学报,2013,33(19):6335-6344.
QIN Yu-sheng, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the Northern Chengdu Plain and their potential ecological risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19):6335-6344.
- [4] 杨忠芳,侯青叶,余涛,等.农田生态系统区域生态地球化学评价的示范研究:以成都经济区土壤Cd为例[J].地学前缘,2008,15(5):23-35.
YANG Zhong-fang, HOU Qing-ye, YU Tao, et al. An example of eco-geochemical assessment for agroecosystems: A study of Cd in Chengdu economic region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):23-35.
- [5] Ali H, Naseer M, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals by *Trifolium alexandrinum*[J]. *Int J Environ Sci*, 2012, 2(3):1459-1469.
- [6] 王庆海,却晓娥.治理环境污染的绿色植物修复技术[J].中国生态农业学报,2013,21(2):261-266.
WANG Qing-hai, QUE Xiao-e. Phytoremediation: A green approach to environmental clean-up [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2):261-266.
- [7] 邢艳帅,乔冬梅,朱桂芬,等.土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J].中国农学通报,2014,30(17):208-214.
XING Yan-shuai, QIAO Dong-mei, ZHU Gui-fen, et al. Research progress of heavy pollution in soil and phytoremediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(17):208-214.
- [8] Sun Y, Zhou Q, Want L, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3):808-814.
- [9] 魏树和,周启星,王新,等.一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)[J].科学通报,2004,49(24):2568-2573.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. A newly discovered cadmium accumulation of super nightshade plant(*Solanum nigrum* L.)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24):2568-2573.
- [10] Zhang T, Wei H, Yang X H, et al. Influence of the selective EDTA derivative phenyldiaminetetraacetic acid on the speciation and extraction of heavy metals from a contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2014, 109:1-6.
- [11] Han Y L, Zhang L L, Gu J G, et al. Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of *Iris halophila* Pall. cultivated in Pb mine tailings[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016:1-7.
- [12] Vigliotta G, Matrella S, Ciatelli A, et al. Effects of heavy metals and chelants on phytoremediation capacity and on rhizobacterial communities of maize[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 179:93-102.
- [13] 陈良华,徐睿,张健,等.螯合剂对香樟生理特征和镉积累效率的影响[J].云南大学学报(自然科学版),2016,38(1):150-161.
CHEN Liang-hua, XU Rui, ZHANG Jian, et al. The effects of chelator on physiological traits and Cd accumulation efficiency of *Cinnamomum camphora*[J]. *Journal of Yunnan University*, 2016, 38(1):150-161.
- [14] Zaheer I E, Ali S, Rizwan M, et al. Citric acid assisted phytoremediation of copper by *Brassica napus* L.[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120:310-317.
- [15] 刘萍,翟崇治,余家燕,等.Cd、Pb复合污染下柠檬酸对龙葵修复效率及抗氧化酶的影响[J].环境工程学报,2012,6(4):1387-1392.
LIU Ping, ZHAI Chong-zhi, YU Jia-yan, et al. Effect of citric acid on remediation efficiency and antioxidant enzyme of *Solanum nigrum* L. under Cd and Pb combined pollution[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(4):1387-1392.
- [16] 张玉芬,刘景辉,杨彦明,等.柠檬酸和EDTA对蓖麻生理特性和镉累积的影响[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):760-766.
ZHANG Yu-fen, LIU Jing-hui, YANG Yan-ming, et al. Effects of CA and EDTA on physiological characteristics and Cd accumulation of *Ricinus communis*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5):760-766.
- [17] 刘金,殷宪强,孙慧敏,等.EDDS与EDTA强化苧麻修复镉铅污染土壤[J].农业环境科学学报,2015,34(7):1293-1300.
LIU Jin, YIN Xian-qiang, SUN Hui-min, et al. EDTA and EDDS enhanced remediation of Cd and Pb contaminated soil by ramie(*Boehmeria nivea*) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1293-1300.
- [18] 王坤,宁国辉,谢建治,等.土壤有机质和螯合剂对龙葵富集重金

- 属 Cd 的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):259-270.
- WANG Kun, NING Guo-hui, XIE Jian-zhi, et al. Influence of soil organic matter and chelating agent on enrichment heavy metal Cd of *Solanum nigrum* L.[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):259-270.
- [19] 詹淑威, 潘伟斌, 赖彩秀, 等. 外源有机酸对小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.)修复镉污染土壤的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10):5096-5102.
- ZHAN Shu-wei, PAN Wei-bin, LAI Cai-xiu, et al. Effects of exogenous organic acids on phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Euphorbia thymifolia* L.[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(10):5096-5102.
- [20] 蒋婷, 姜贝贝, 潘远智, 等. 不同形态氮素对龙葵镉毒害的缓解效应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6):1060-1068.
- JIANG Ting, JIANG Bei-bei, PAN Yuan-zhi, et al. Mitigation of different forms of exogenous nitrogen on Cd toxicity to *Solanum nigrum* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6):1060-1068.
- [21] 陈颖, 刘柿良, 杨容子, 等. 镉胁迫对龙葵生长、质膜 ATP 酶活性及氮磷钾吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(1):121-128.
- CHEN Ying, LIU Shi-liang, YANG Rong-jie, et al. Effects of cadmium on growth, plasma membrane ATPase activity, and absorption of N, P and K in *Solanum nigrum* L. seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(1):121-128.
- [22] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):293-298.
- SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):293-298.
- [23] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Restoration theory and method of contaminated soil[M]. Beijing:Science Press, 2004.
- [24] 胡浩, 潘杰, 曾清如, 等. 低分子有机酸淋溶对土壤中重金属 Pb, Cd, Cu 和 Zn 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1611-1616.
- HU Hao, PAN Jie, ZENG Qing-ru, et al. The effects of soil leaching with low-molecular-weight organic acids on Pb, Cd, Cu and Zn [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1611-1616.
- [25] 仓龙, 周东美, 邓昌芬. 柠檬酸和 EDTA 对 Cr(VI)在黄棕壤和红壤上吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):710-713.
- CANG Long, ZHOU Dong-mei, DENG Chang-fen. Effect of citric acid and EDTA on adsorption of chromium(VI) in yellow brown soil and red earth[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(4):710-713.
- [26] 王学锋, 林海, 冯颖俊, 等. EDTA、柠檬酸对 Cd、Ni 污染土壤植物修复的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6):1478-1492.
- WANG Xue-feng, LIN Hai, FENG Ying-jun, et al. Effects of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd and Ni contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1478-1492.
- [27] 吴烈善, 吕宏虹, 苏翠翠, 等. 环境友好型淋洗剂对重金属污染土壤的修复效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10):4486-4491.
- WU Lie-shan, LÜ Hong-hong, SU Cui-cui, et al. Remediation of heavy metals contaminated soil by washing with environmentally friendly washing liquids[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(10):4486-4491.
- [28] Sun Y B, Zhou Q X, Wang L, et al. The influence of different growth stages and dosage of EDTA on Cd uptake and accumulation in Cd-hyperaccumulator(*Solanum nigrum* L.)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3):348-353.
- [29] 吴秋玲, 王文初, 何闪英. GA3 与 EDTA 强化黑麦草修复 Pb 污染土壤及其解毒机制[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10):2999-3005.
- WU Qiu-ling, WANG Wen-chu, HE Shan-ying. Enhancement of GA3 and EDTA on *Lolium perenne* to remediate Pb contaminated soil and its detoxification mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10):2999-3005.
- [30] 雒焕章, 南忠仁, 胡亚虎, 等. 不同螯合剂处理下杨树对土壤中 Cd 的吸收和富集效应[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3):461-465.
- LUO Huan-zhang, NAN Zhong-ren, HU Ya-hu, et al. Chelate-induced uptake and accumulation of Cd in soil by poplar(*Populus bolleana* Lauche)[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(3):461-465.
- [31] 沈斌. EDTA 和柠檬酸对鱼腥草修复矿区重金属污染土壤的影响研究[D]. 成都:四川农业大学, 2015.
- SHEN Bin. Effects of EDTA and citric acid on *Houttuynia cordata* Thunb remediation of mining soil pollution[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2015.
- [32] Lopez B J, Nieto J M F, Ramfrez R V, et al. Organic acid metabolism in plants: From adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils[J]. *Plant Sci*, 2000, 160(1):1-13.
- [33] 郭智. 超富集植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)对镉胁迫的生理响应机制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- GUO Zhi. Study on mechanisms of physiological response of hyperaccumulator plant *Solanum nigrum* L. to cadmium stress[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [34] 廖启林, 刘聪, 王轶, 等. 水稻吸收 Cd 的地球化学控制因素研究:以苏锡常典型区为例[J]. 中国地质, 2015, 42(5):1621-1632.
- LIAO Qi-lin, LIU Cong, WANG Yi, et al. Geochemical characteristics of rice uptake of cadmium and its main controlling factors: A case study of the Suxichang (Suzhou-Wuxi-Changzhou) typical area[J]. *Geology in China*, 2015, 42(5):1621-1632.